



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VLIV VLHKOSTI SMĚSI EXOTERMICKÝCH NÁLITKŮ NA
TUHNUTÍ KOVU V NÁLITCÍCH**

EFFECT OF THE EXOTHERMIC MIXTURE HUMIDITY ON THE METAL SOLIDIFICATION IN THE FEEDERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Stanislav Hejduk

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Stanislav Hejduk**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv vlhkosti směsi exotermických nálitků na tuhnutí kovu v nálitcích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nálitky slouží při výrobě odlitků jako zásobníky tekutého kovu, které hlavně eliminují objemové změny při tuhnutí odlitků. Pro zajištění této funkce je nezbytné, aby doba tuhnutí nálitku byla delší, než je doba tuhnutí dané partie odlitku, která je nálitkem zajišťována. Pro prodloužení doby tuhnutí nálitků jsou pro zhotovení nálitků používány exotermické nebo izolační materiály. Exotermické materiály jsou založeny na principu, kde redukcí oxidů železa hliníkem dochází k exotermické reakci a teplo je využito na snížení rychlosti odvodu tepla z nálitku do jeho okolí. Na průběh této reakce má vliv jak složení směsi nálitku tak případně i její vlhkost.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je provést literární rešerši v oblasti nálitkování odlitků a s ní související slévárenské technologie a tuhnutí odlitků. V teoretické části dále detailně rozebrat problematiku exotermických nálitků, princip jejich funkce i možnosti řízení intenzity exotermické reakce. V rámci experimentální práce navrhnout experiment ověření vlivu vlhkosti exotermické směsi nálitku na jeho dosazovací schopnost a průběh tuhnutí odlitku. Dále provést vlastní experiment včetně jeho vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

CAMPBELL, J. Casting, Butterworth - Heinemann Ltd., Oxford, 2000. ISBN 0-7506-1696-2.

ČECH, J., Š. KERŠNER. Izolace jako náhrada kapes u ocelových odlitků - návrh technologie a praktická aplikace. In 53. Slévárenské dny - Sborník přednášek z 53. slévárenských dnů, Blok A - Sekce technologická. Brno. 2016. s. 20 - 26. ISBN 978-80-02-02688-4.

ELBEL, T. a kol. Vady odlitků ze slitin železa. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992, 340 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

HEJDUK Stanislav: Vliv vlhkosti směsi exotermických nálitků na tuhnutí kovu v nálitcích

Práce se zabývá řešeršní činností v oblasti nálitkování odlitků a dále i podstatou a principem exotermických nálitků. Dále byl navržen experiment pomocí, kterého byly zkoumány účinky vlhkosti na exotermické směsi a její dosazovací schopnosti. Na experiment byly použity nálitky s různým stupněm vlhkosti zaformované do bentonitových forem. Dále byly zhodnoceny křivky tuhnutí získané během tuhnutí taveniny v nálitku a staženiny, které v nálitku vznikly.

Klíčová slova: nálitek, exotermická směs, slitiny hliníku, teplotní křivky

ABSTRACT

HEJDUK Stanislav: Effect of the exothermic mixture humidity on the metal solidification in the feeders

The work deals with research activities in the field of casting and also the nature and principle of exothermic castings. Furthermore, an experiment was designed to investigate the effects of moisture on the exothermic mixture and its settling ability. For the experiment, risers with different degrees of humidity formed into bentonite molds were used. Furthermore, the solidification curves obtained during the melt in the riser and the shrinkage which were formed in the riser were evaluated.

Keywords: riser, exothermic mixture, aluminum alloys, temperature curves

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HEJDUK, Stanislav. *Vliv vlhkosti směsi exotermických nálitků na tuhnutí kovu v nálitcích* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132882>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Antonín Záděra.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 21.5.2021

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Ing. Antonínovi Záděrovi, Ph.D. a Ing. Martinovi Myškovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval své rodině a přátelům, za podporu během celého mého studia.

Obsah

ÚVOD	9
1 TUHNUTÍ KOVU	10
1.2 Tuhnutí odlitku	10
1.3 Tepelné uzly	11
1.3.1 Zabránění vzniku tepelného uzlu	11
2 STAŽENINY	12
2.1 Vznik staženiny	12
2.2 Zamezení vzniku staženiny	13
3 NÁLITKY	13
3.1 Typy nálitků	13
3.2 Stanovení velikosti nálitku	16
3.3 Umístění nálitku	17
3.4 Doporučený tvar nálitků	18
3.5 Stanovení potřebného počtu nálitků	18
3.6 Využití objemu nálitku	19
3.7 Tvarový součinitel	19
3.8 Součinitel posunu modelu nálitku	19
4 TEPELNĚ OŠETŘENÉ NÁLITKY	20
4.1 Zásypy	20
4.2 Izolační obklady	20
4.2.1 Žáruvzdorné obklady	21
5 EXOTERMICKÉ OBKLADY	22
5.1 Typy exotermických směsí	22
5.1.1 Termitové směsi	22
5.1.2 Křemíkové směsi	23
5.1.3 Uhlíkové směsi	24
5.2 Formovací směsi exotermických nálitků	24
6 PRAKTICKÁ ČÁST	25
6.1 Návrh experimentu	25
6.2 Realizace experimentu	25
7 VYHODNOCENÍ KŘIVEK CHLADNUTÍ	30
8 OBJEM STAŽENINY V NÁLITKU	35
ZÁVĚRY	37
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	38

ÚVOD

Slitiny hliníku patří k nejpoužívanějším slitinám v moderním průmyslu. Tyto slitiny mají mnoho kladných vlastností jako například odolnost vůči korozi, dobrá slévatelnost a tvařitelnost, dobrou pevnost při nízké hustotě atd.. Slitiny hliníku nachází uplatnění od potravinářského až po letecký a kosmický průmysl, zejména je pak najdeme v automobilovém průmyslu (**Obr. 1**).

Slitiny hliníku se nejčastěji odlévají za pomoci nízkotlakého případně vysokotlakého lití. Díky nízké teplotě taveniny u hliníkových slitin a výrobě velkých sérií, je možné použít kovové formy. To sníží náklady při větší seriovosti odlitků a zvýší kvalitu povrchu odlitků. Díky dobré zabíhavosti jsme schopni odlévat složité, a přitom tenkostěnné odlitky. V případech, kdy se jedná o malé série, nebo jsou odlitky příliš velké, pak se volí varianta odlévání do pískových forem.

Při odlévání do pískových forem se smrštění slitin hliníku kompenzuje, a to pomocí nálitků. Náletek slouží jako zásobník kovu, který je předformovaný ve formě a je zaplněn taveninou současně s odlitkem. Takto vyrobený náletek nazýváme nálitkem přirozeným. Přirozený náletek však nemá vysoké využití taveniny v nálitku, a proto se používají nálitky tepelně ošetřené neboli izolované a exotermické. Při použití izolačních a exotermických nálitků nám vzroste využití taveniny v nálitku a tím pádem nám klesají výrobní náklady odlitků.

Cílem práce bylo ověřit vliv vlhkosti na exotermické směsi nálitků a na průběh tuhnutí kovu v nálitku. Posouzení bylo provedeno na základě studia křivek tuhnutí slitiny v exotermickém nálitku v závislosti na vlhkosti směsi.



Obr. 1 Příklady odlitků ze slitin hliníku (lité kolo, píst, blok spalovacího motoru)

1 TUHNUTÍ KOVU

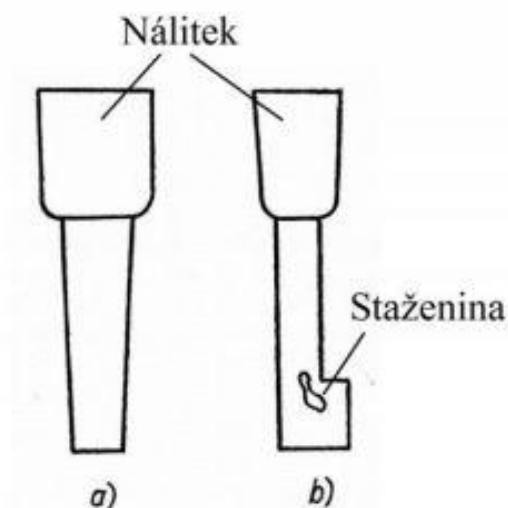
Jedná se o proces ve, kterém se mění tekutá fáze na fázi pevnou (krystalickou). Chladnutí taveniny doprovází zmenšování objemu kovu ve formě neboli smršťování. Smršťování je způsobeno měnící se hustotou kovu, která se v průběhu ochlazování zvyšuje, a podle zákona o zachování hmoty snižuje i objem kovu v odlitku. Smršťování se dá rozdělit do tří fází smršťování taveniny, smršťování při tuhnutí a smršťování v pevném stavu. Velikost smršťování se u každého kovu liší a lze ho vyjádřit pomocí procent. Úbytek kovu v odlitku musí být kompenzován dodáním dalšího kovu do odlitku, aby jsme zamezili vzniku staženin používáme nálitky.

1.2 Tuhnutí odlitku

Snahou při výrobě odlitku je dostat staženiny z odlitku do nálitku. Náliťek je zásobník kovu který slouží k náhradě chybějícího kovu v odlitku po celou dobu jeho tuhnutí, z toho vyplývá: [11], [6]

- Náliťek musí tuhnout pomaleji než odlitek
- Náliťek musí obsahovat dostatečné množství kovu na kompenzaci smrštění
- Tlakové podmínky v nálitku musí umožnit proudění kovu z nálitku do taveniny

Aby mohla tavenina procházet od nálitku až k nejvzdálenějšímu bodu odlitku musí docházet k usměrňování tuhnutí. Při usměrněném tuhnutí dochází ke ztuhnutí nejbližšího bodu odlitku a jako poslední tuhne kov v místě nálitku. Při jiném průběhu tuhnutí hrozí vznik staženin v odlitku (**Obr. 2**). [6]



Obr. 2 Schéma odlitku vytvořeného pomocí usměrněného tuhnutí a) a pomocí neusměrněného tuhnutí b) [6]

Tuhnutí můžeme rozdělit z hlediska teploty na dva typy. Tuhnutí za konstantní teploty takto tuhnou čisté kovy a slitiny o eutektickém složení. Druhý typ je tuhnutí mezi teplotami likvidu (začátek tuhnutí) a solidu (konec tuhnutí). [6]

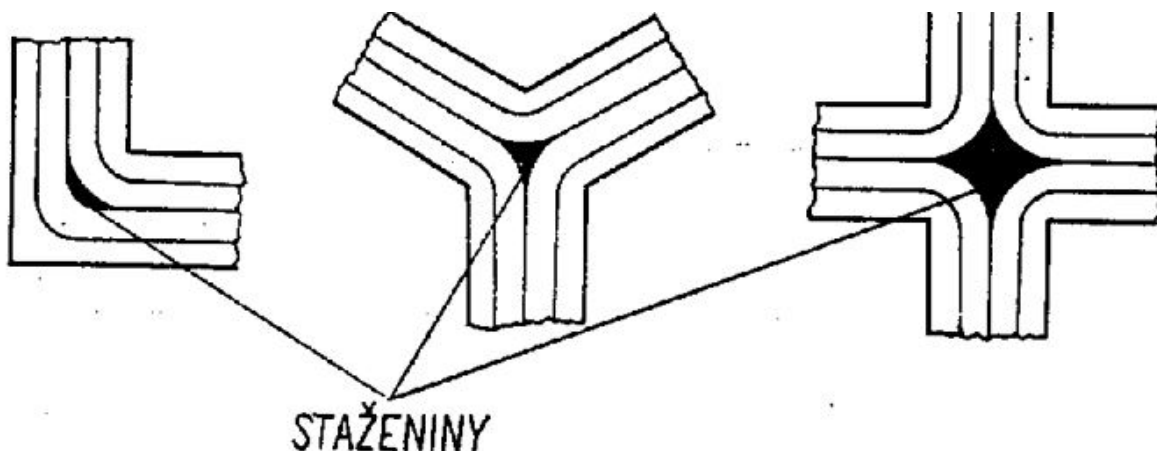
Podle typu tuhnutí vznikají v odlitku izotermní plochy tuhnutí. To je hranice mezi tekutou a tuhrou fází. Nebo vzniká dvoufázové pásmo určené plochou izolikvidu a izosolidu, v ní se nachází směs tekuté a tuhé fáze (**Obr. 3**). [6]



Obr. 3 Dvoufázové pásmo [13]

1.3 Tepelné uzly

Tepelné uzly, jsou místa v odlitku, která tuhnou pomaleji než jejich okolí. Vyskytuje se v silných stěnách odlitku (**obr. 4**). V tepelném uzlu se pořád vyskytuje tavenina, přestože zbytek odlitku už je ztuhli. Během tuhnutí zbylé taveniny v tepelném uzlu dochází ke zmenšení jejího objemu, což vede ke vzniku staženiny. [22], [11]



Obr. 4 Místa vzniku tepelného uzlu [22]

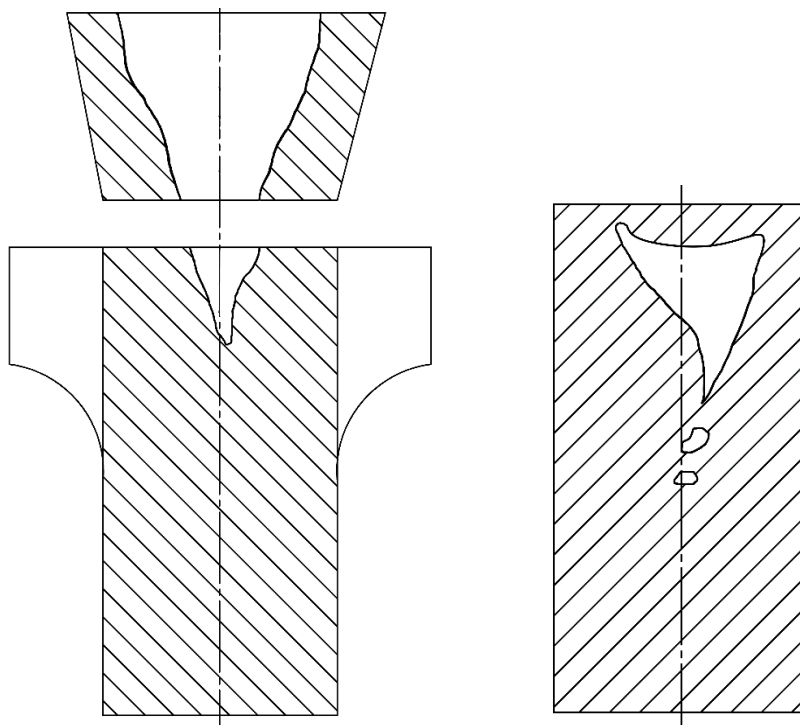
1.3.1 Zabránění vzniku tepelného uzlu

Nejlepší možností, jak zabránit vzniku tepelných uzlů je změnit konstrukci odlitku. Můžeme změnit tvar součásti, ale častěji se změni technologické přídávky. Další možností je použití nálitků. Poslední variantou je tepelný uzel chladit. Chlazení eliminuje vznik tepelného uzlu a tím odpadá nutnost použití nálitku. [11]

2 STAŽENINY

Jedná se o vnější otevřenou dutinu na povrchu součásti (otevřená staženina) nebo o dutiny uvnitř odlitku (uzavřená staženina) (**Obr. 5**). Staženina vzniká v důsledku fyzikálního pochodu při tuhnutí taveniny. Otevřenou staženinu můžeme najít po odstranění nálitku nebo v místě tepelného uzlu, pokud nebyl nálitkován. Otevřená staženina se vyskytuje pouze ojediněle, a to především v silnější stěně či v tepelném uzlu za podtlaku. Povrch bývá zoxidovaný a sahá do určité hloubky odlitku. [2]

Uzavřená (vnitřní) staženina je mnohem častější než staženina otevřená. Často se nachází v horní části odlitku. Uzavřená staženina má nepravidelný tvar, který je převážně ovlivněn intenzitou odvodu tepla od stěn a hran formy. Povrch je neokysličen a jsou na něm vyloučeny dendrity. [2]



Obr. 5 Otevřená staženina (vlevo) a uzavřená staženina (vpravo) [2]

2.1 Vznik staženiny

Staženina je důsledek fyzikálního pochodu zmenšení objemu kovu při tuhnutí. Stává se vadou když se objeví na odlitku. Vznik staženiny je spojen s nedostatečným doplněním objemu kovu při jeho tuhnutí. Staženina vzniká v oblasti tepelných uzlů a u zesílené části stěny odlitku, jelikož kov zde tuhne nejpozději a slouží jako zásoba taveniny pro své okolí. Vzniká především z důvodu nevhodné konstrukce odlitku. Častým důvodem může být nedostatečný objem nálitků a jejich špatné umístění. [2]

U ocelových odlitků je staženina větší, než u jiných materiálů například litiny. U litiny se během tuhnutí zvětšuje objem z důvodu grafitizace, což kompenzuje do určité míry smrštění a tím pádem i snižuje riziko vzniku staženiny. Při vhodné konstrukci odlitku a vhodné lící teplotě lze zajistit homogenitu odlitku. [2]

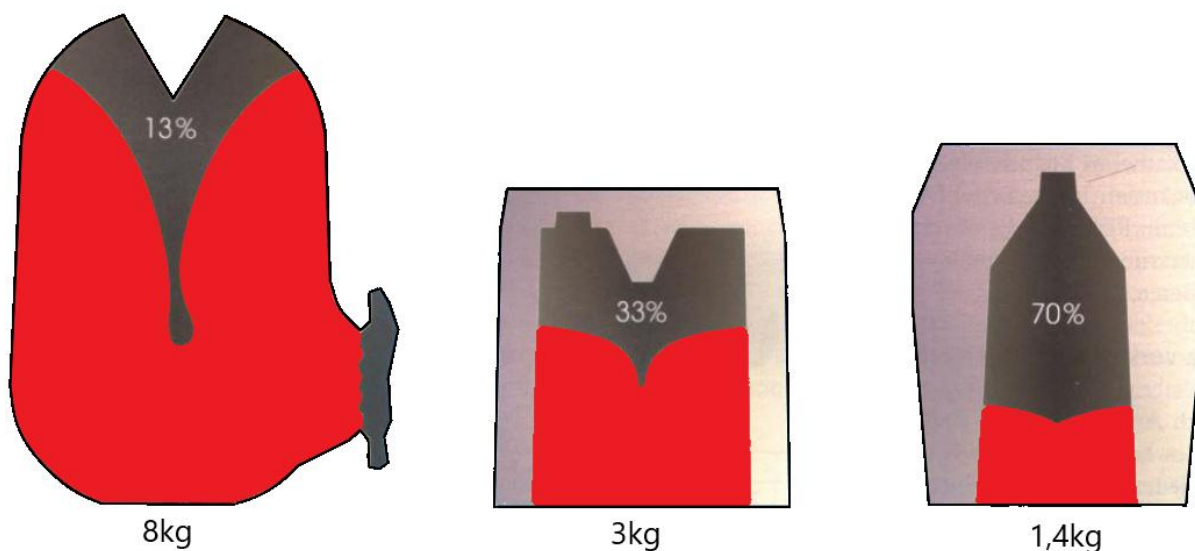
2.2 Zamezení vzniku staženiny

Staženinám se dá nejlépe předejít správným navržením tvaru součásti pro to je nutné provést potřebné výpočty (návrh nálitků a vtokové soustavy). Výpočet se může ve zjednodušené formě vypočítat podle vzorců nebo za pomoci počítačového programu [19]. Také správné umístění soustavy ve formě hraje při tuhnutí a vzniku vad významnou roli. Pro zpomalení tuhnutí kovu v nálitcích se může použít exotermický náletek u menších odlitků a u větších nálitků pak izolace. [2]

3 NÁLITKY

Nálitky mají mnoho funkcí. Tyto dvě jsou však nejpodstatnější. Za prvé, náletek musí v celé soustavě odlitku tuhnout jako poslední. A druhou funkcí, kterou by měl splňovat je, že v místě tepelného uzlu nebo odlitku musí sloužit jako dostatečná zásobárna tekutého kovu na doplnění vzniklého volného místa, který vznikne během procesu smrštění při tuhnutí to je tzv. objemová dostatečnost. [8]


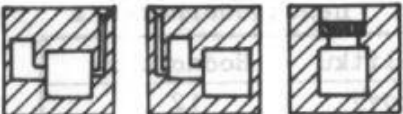

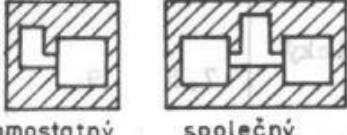



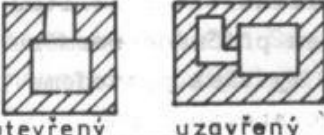
Náletek se charakterizuje pomocí tzv. modulu jedná se o nejdůležitější parametr nálitku. Ten se dá používat pouze u nálitků přirozených, u nálitků tepelně ošetřených se zavádí modul relativní. Snížením rychlosti ochlazování nálitku dojde k tomu, že se náletek začne chovat jako kdyby byl větší či měl větší modul. Proto se zavedl pojem faktor posunutí modulu. Na **obr. 6** jsou znázorněny tři nálitky použité na stejném odlitku a ze všech nálitků se využije stejný objem kovu. Z toho jasně plynou ekonomické výhody izolovaného a exotermického nálitku. [7]



Obr. 6 Využití kovu u nálitkování stejného modelu. Zleva přirozený náletek, náletek s exotermickým obkladem a ECO-náletek [9]

3.1 Typy nálitků

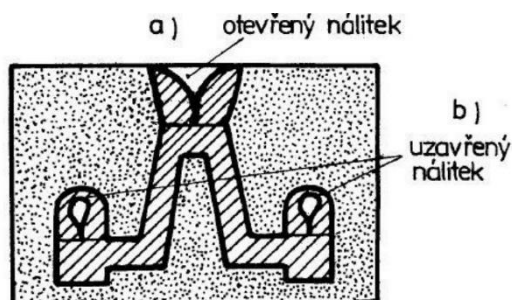
Nálitky dělíme podle mnoha hledisek: podle umístění ve formě, tvaru, tepelného ošetření nálitku, tlaku v nálitku, polohy nálitku, uspořádání nálitku, podle způsobu oddělení či provedení nálitku. Přehled typů nálitků se schematickým znázorněním je uveden na **obr. 7**. [8]

ZNAK	SCHEMATICKÝ OBRÁZEK	ZNAK	SCHEMATICKÝ OBRÁZEK
Tvar	 koule válec hranol ostatní	Poloha	 odlehlý přilehlý kombinace
Umístění	 čelní boční spodní	Uspořádání	 samostatný společný
Tepelný režim	 normální izolovaný exotermický	Způsob oddělení	 řezání urážení
Tlak	 podtlakový atmosferický přetlakový	Provedení	 otevřený uzavřený

Obr. 7 Schematické znázornění typů odlitků [8]

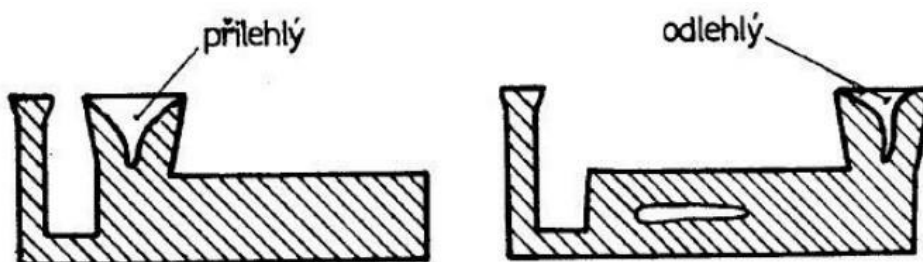
Nálitky podle umístění ve formě (obr. 8): Tento typ nálitku se rozděluje na dva základní typy: na uzavřený ve formě, který je skrytý a na vyústěné otevřený na povrchu formy. [10]

Nálitky podle polohy vůči odlitku: Rozděluje se na dva: na horní, který se umísťuje nad odlitek a boční ten je připojen ze strany k odlitku. [10]



Obr. 8 Umístění otevřeného a uzavřeného nálitku [10]

Nálitky podle polohy vzhledem k zaústění vtokové soustavy (obr. 9): Rozděluje se na dva přilehlé je jsou naplňované teplou taveninou z vtokové soustavy a odlehlé které se zaplní až poté co tavenina zaplní formu. Přilehlé nálitky mají oproti nálitkům odlehlým vyšší účinnost. [10]

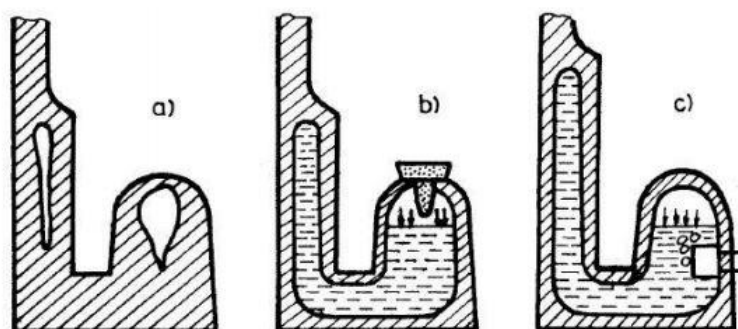


Obr. 9 Umístění přilehlého a odlehlého nálitku [10]

Nálitky podle tlaku v nálitku (obr. 10): Rozděluje na podtlakové, atmosférické a přetlakové. Podtlakové jsou nálitky, u kterých dochází po odlití ke ztuhnutí povrchové vrstvy a při odjímání kovu odlitkem z nálitku dochází ke vzniku dutiny v nichž dochází ke vzniku podtlaku.

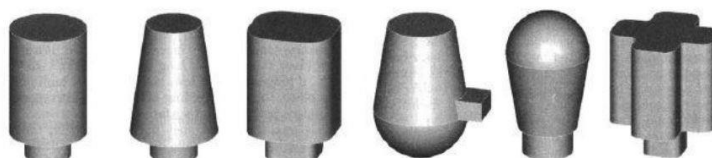
U atmosférického nálitku působí atmosférický tlak na hladině kovu otevřeného nálitku a tím dopomáhá k lepšímu dosazování do kovu odlitku. U uzavřeného nálitku se prodyšností formy nebo pomocí Williamsova jádra může dostat vzduch až k hladině nálitku.

Přetlaku u nálitků dosáhneme pomocí keramického tělíska s náplní vápence. Při plnění nálitku taveninou se vápenec (CaCO_3) pomocí dodaného tepla rozloží na $\text{CaO} + \text{CO}_2$ a tím vniká přetlak. Pro vznik přetlaku je důležité, aby povrchová vrstva kovu byla již ztuhlá. Toho můžeme dosáhnout za pomoci izolačního pouzdra, které zbrzdí zahřívání vápence o požadovanou dobu. [11], [12]



Obr. 10 a) podtlak, b) atmosférický, c) přetlak [10]

Nálitky podle tvaru (obr. 11): Základními tvary jsou válcové, kuželové, obdélníkové, zakulacené dole, zakulacené nahoře, křížové.



Obr. 11 Tvary nálitků [13]

Nálitky podle druhu tepelného ošetření: Můžeme je rozdělit na čtyři základní typy.

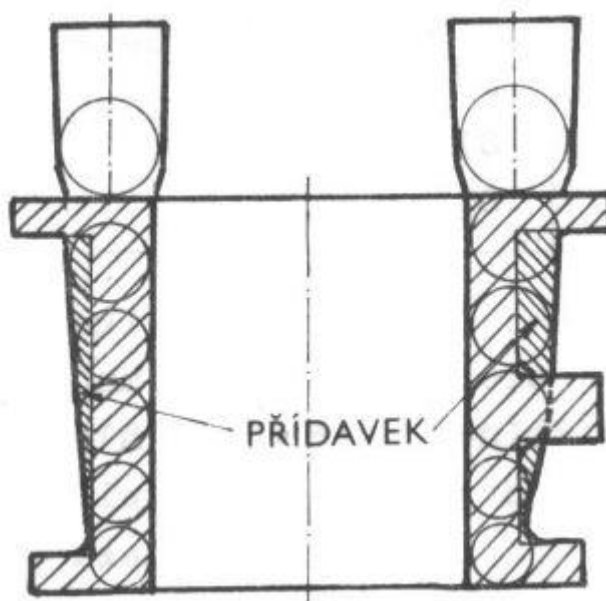
- Přirozený (neošetřený) nálitek
- Zasypané izolačně se zasypaným popílkem – šamotovým práškem nebo pískem ke zpomalení tuhnutí hladiny kovu
- Zasypané exotermicky – u nálitků probíhá chemická reakce která uvolňuje teplo, tím lépe chrání hladinu před ztuhnutím
- Izolační nálitek
- Exotermické nálitek

[14], [11]

3.2 Stanovení velikosti nálitku

Pro navržení správného velikosti nálitku musíme dodržet tři základní podmínky. Pokud podmínky nebudou dodrženy náletek nebude správně fungovat.

Heuversova podmínka (metoda vepsaných koulí) – Principem je, že u každá vepsaná koule v tepelném uzlu odlitku musí být schopna dostat se přímou trajektorií do nálitku viz. **Obr. 12**.



[8]

Metoda Ivanova a Příbyla (výpočet pomocí staženiny) – Tato podmínka říká, že náletek musí být dostatečně velký na to, aby mohl kompenzovat smrštění v odlitku. Neboli, objem vzniklé staženiny v odlitku musí být menší, než je objem nálitku.

$$V_{st} = \beta \cdot (V_o + V_n) [cm^3] \quad (1)$$

Kde: V_{st} – objem staženiny [cm^3]

β - poměr smrštění slitiny při tuhnutí [-]

V_o – objem odlitku nebo jeho nálitkové části [cm^3]

V_n – objem nálitku [cm^3]

Koeficient nehospodárnosti nálitku x :

$$x = \frac{V_n}{V_{st}} \quad (2)$$

Na základě těchto vztahů byl odvozen vztah:

Obr. 12 Metoda vepsaných koulí [8]

$$V_n = V_o \cdot \frac{\beta \cdot x}{1 - \beta \cdot x} [cm^3] \quad (3)$$

[8]

Metoda Chvorinova a Wlodawera (modulové teorie) – Doba tuhnutí nálitku by měla být delší než doba tuhnutí odlitku.

$$\tau_n > \tau_o \quad (4)$$

Kde: τ_n – čas tuhnutí nálitku [cm]

τ_o – čas tuhnutí odlitku [cm]

$$\tau = k \cdot M^2 [s] \quad (5)$$

$$M = \frac{V}{S} [mm] \quad (6)$$

Kde: τ – čas tuhnutí odlitku/nálitku [s]

k – konstanta tuhnutí závislá na vlastnostech slitiny a tuhnutí formy [$m \cdot s^{-1}$]

M – modul odlitku/nálitku [cm]

V – objem tělesa [cm^3]

S – ochlazený povrch tělesa [cm^2]

Podmínku lze přepsat na:

$$M_n > M_o \quad (7)$$

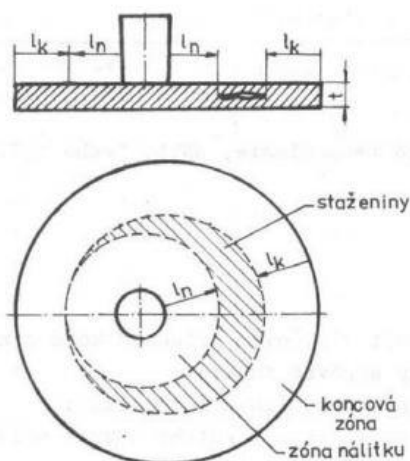
Kde: M_n – modul nálitku [cm]

M_o – modul odlitku [cm]

[8]

3.3 Umístění nálitku

Pro správné fungování nálitku je nutné, aby byl náletek ustaven na správném místě na odlitku. Hlavním kritériem je při výběru místa dosazovací schopnost nálitku (**obr. 13**) a poloha tepelných uzlů na odlitku. Dosazovací schopnost nálitku závisí na tvaru teplotního pole systému náletek-odlitek, přičemž důležité je docílit usměrněného tuhnutí, jinak hrozí vznik staženin v odlitku. [8]

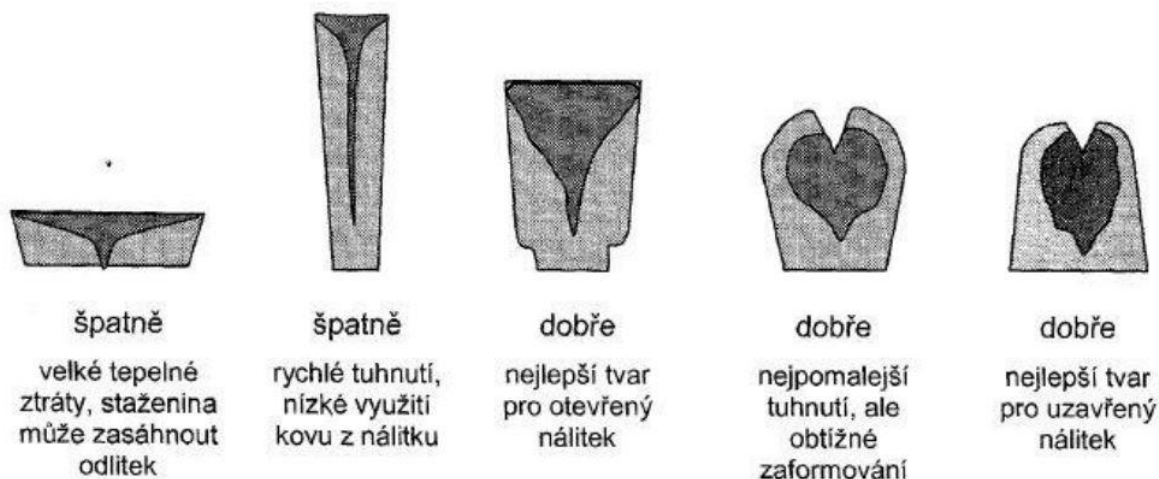


Obr. 13 Dosazovací schopnost nálitku [8]

3.4 Doporučený tvar nálitků

Tvar nálitku ovlivňuje dobu tuhnutí kovu v nálitku a dále i tvar staženiny. Hlavním předpokladem u tvaru nálitku je, aby při co nejmenším objemu tuhl co možná nejdéle. Při stejné intenzitě ochlazování povrchu nálitku je ideální tvar koule, která má při daném objemu nejmenší povrch. Takovýto tvar by však zamezoval připojení nálitku na odlitek, a proto má tento tvar může mít pouze horní část odlitku. A po zaformování by jsme byli neschopni vyjmout model z formy. Proto se používají nálitky tvaru válce a komolého kužele. [6], [20] Nejvýhodnější tvar otevřeného nálitku je z hlediska největšího modulu a možnosti zaformování komoli kužel. V místě napojení nálitku na odlitek je doporučeno přidat zúžení které brání vzniku tepelného uzlu a usnadňuje oddělení nálitku.

Konstrukce nálitků má několik pravidel. Uzavřené nálitky by měly být v horní části uzavřené, u válcových nálitků půlkruhovým tvarem a u neokrouhlých nálitků pak odpovídajícím zaoblením. Na **obr. 14** je u uzavřených nálitků znázorněno Williamosovo jádérko, které brání podtlaku. Při zaplnění nálitku taveninou se tenká špička Williamosova jádérka prohřeje na takovou teplotu, že na ní neztuhne kov a díky porézности formy může atmosférický tlak působit na povrch taveniny a napomáhá dosazovacím schopnostem nálitku. Na nálitku by se neměly vyskytovat hrany, které mají velké tepelné ztráty. [2], [21]



Obr. 14 Nevhodné a doporučené tvary nálitků [21]

3.5 Stanovení potřebného počtu nálitků

Počet nálitků u odlitků se dá stanovit podle dvou hledisek. Prvním hlediskem je počet tepelných uzlů, což jsou místa s nashromážděním materiálu nebo místo s jinak zpomaleným tuhnutím. Druhým hlediskem jsou rozměry odlitku, jelikož oblast účinnosti nálitku je při rovnoměrné tloušťce odlitku omezená. Nálitky mají schopnost dodávat tekutý kov jen do určité vzdálenosti, tudíž je-li odlitek rozlehlý, je nutné počítat s použitím dostatečného počtu nálitků. Pokud se jedná o odlitek, kdy počet nálitků je určen počtem uzlů, je nutné přidělit každému tepelnému uzlu jeden náliček, nebo jej budeme chladit pomocí chladítka. [5], [6]

3.6 Využití objemu nálitku

Během tuhnutí odlitku dochází ke smršťování objemu kovu to souvisí se vznikem uspořádané krystalické mřížky. Chybějící kov je doplňován z nálitku. Objem kovu nutný na doplnění je roven objemu vznikající makrostaženiny v nálitku - V_{ST} . Po ztuhnutí kovu ve formě zůstane v nálitku nevyužitý kov V_{ZB} . Objem nálitku se vyjadřuje jako:

$$V_N = V_{ST} + V_{ZB} \quad [cm^3] \quad (8)$$

Využití kovu nálitku definujeme jako:

$$\eta_N = \frac{V_{ST}}{V_N} \cdot 100 \quad [\%] \quad (9)$$

Využití kovu v neizolovaném nálitku se pohybuje okolo 14 až 18 %. U izolovaných nálitků s exotermickým zásypem se dostáváme na využití taveniny okolo 30 až 35 %. a u exotermických nálitků se dostaneme i přes 50 % což ve výsledku značně snižuje náklady i množství vratného materiálu. Velikost nálitku je závislé na tvaru odlitku, na druhu a tvaru nálitku a na tvaru staženiny. Ideální tvar staženiny (široká a mělká) vede k vysokému využití kovu v nálitku. [4]

3.7 Tvarový součinitel

Tvar součásti má velký vliv na volbu nálitku, protože kulatý odlitek bude mít jinou intenzitu přijímat taveninu z nálitku než odlitek tvaru desky. Veličina, která danou vlastnost popisuje se nazývá tvarový součinitel. Někdy je nazýván i jako perimetrický kvocient. Tvarový koeficient q definujeme jako poměr objemu, a třetí mocniny modulu tělesa nebo dosazovaného uzlu.

$$q = \frac{V}{M^3} [-] \quad (10)$$

Čím kompaktnější je odlitek, tím je tvarový součinitel menší. Nejmenší tvarová součinitel má koule, která má $q = 113$. Naopak nejvyšší hranice teoreticky není omezená. U tenkých desek se tvarový součinitel pohybuje od tisíců do desetitisíců. [4]

3.8 Součinitel posunu modelu nálitku

Součinitel posunu modulu nálitku, který se označuje f , se také občas nazývá koeficient zvýšení modulu nálitku. Tento součinitel se zavádí, pokud je nálitek tepelně ošetřen, tzn. pokud je nálitek opatřen exotermickým nebo izolačním nálitkem. Koeficient udává relativní posun modulu tepelně ošetřeného nálitku proti nálitku tepelně neošetřeném tedy přirozeném nálitku. [4]

$$M_{tep} = f \cdot M_{ne} \quad [cm] \quad (11)$$

Kde: M_{tep} - modul tepelně ošetřeného (izolovaného nebo exotermického) nálitku

M_{ne} - modul tepelně neošetřeného (přirozeného) nálitku

M_{tep} se také označuje jako tepelný modul a M_{ne} jako geometrický modul. Hodnota součinitele posunu modelu nálitku f je větší než 1 a stanovuje se z konkrétní doby tuhnutí tepelně ošetřeného nálitku τ_{tep} a doby tepelně neošetřeného nálitku τ_{ne} . [4]

$$f = \frac{\sqrt{\tau_{tep}}}{\sqrt{\tau_{ne}}} \quad [-] \quad (12)$$

4 TEPELNĚ OŠETŘENÉ NÁLITKY

Nejstarším typem nálitků je náletek přirozený. Přirozený náletek je zaformován přímo do formy a je obklopen stejnou formovací směsí jako odlitek. Jsou zde stejné tepelné ztráty jako u odlitku. Využití kovu v přirozeném nálitku je celkem nízké. Přirozené nálitky se stále používají, ale jsou čím dál častěji nahrazovány jinými typy nálitků. [15]

4.1 Zásypy

Zásypy byly prvním zlepšením nálitků v oblasti tepelných ztrát. Tepelnou efektivitu můžeme zvýšit za pomoci snížení tepelných ztrát, nebo přidáním nového tepelného zdroje v nálitku. Zásypy se po zaplnění nálitku kovem sypou na hladinu kovu. Brání sálání tepla z nálitku (izolační zásypy) nebo do nálitku teplo vnáší (exotermické zásypy). Jako izolační zásyp se může používat expandovaný perlit nebo vermikulit, které mají nízkou hustotu a výborné izolační vlastnosti. Exotermické zásypy se mohou používat zvlášť nebo v kombinaci s izolačními zásypy. Zásypy se většinou používají v zrnité nebo práškové podobě. Klasické zásypy se dnes nahrazují plovoucími krycími víčky. Vyrábí se izolační, exotermické tak i kombinované. Jsou vyráběny z keramických materiálů na bázi křemičitanu hliníku s nízkou hmotností. Používání krycích víček zlepšilo stabilitu dosazování nálitků tím, že je možné přesně určit hmotnost zásypu, rovnoměrnost pokrytí a dobu aplikace. [15]

4.2 Izolační obklady

Izolační obklady slouží ke zpomalení odvodu tepla z taveniny, a to buď v nálitku nebo přímo na odlitku. Izolovaný náletek má oproti přirozenému nálitku o stejné účinnosti menší objem. Tím se sníží množství použité taveniny na odlití odlitku zároveň snížíme výrobní náklady a zvýšíme produktivitu slévárny. Izolační obklady jsou vyráběny z žáruvzdorných materiálů s minimální tepelnou vodivostí. Využití nalézáme při odlévání velkých odlitků. Při odlévání ocelových odlitků je v mnoha případech nutno použít tzv. kapsy pro prodloužení dosazovací zóny, vytváření tepelného gradientu a zajištění zdravotnosti odlitku. V tom případě však vzroste spotřeba tekutého kovu, je nutnost tvarového pálení a dále ještě delší časy při obrábění odlitku. To vše nám navyšuje výrobní náklady. V těchto případech se dá nahradit kapsa izolací aplikovanou přímo na odlitek příklad na **obr. 15**. [3], [15], [16]



Obr. 15 Použití izolace KAPLAD na místo kapsy [3]

4.2.1 Žáruvzdorné obklady

Nejběžnější typy izolačních obkladů jsou tvořeny vlákny na bázi Al_2O_3 , které jsou z 60 % objemu tvořeny uzavřenými póry. To nám zaručuje vysoké izolační schopnosti. Tyto vláknité obklady (**obr. 16**) mají vyšší tepelnou charakteristiku a menší hmotnost a velikost než nálitek přirozený. Nevýhodou je jejich křehkost a náchylnost což může vést k prasklinám a porušení celistvosti izolace. [3], [15], [16]

Tento typ izolačních obkladů se využívá na menší odlitky s tloušťkou stěny do 70 mm [3]. Pokud se tloušťka stěny nedodrží hrozí odtavení izolace a plochy je nutné brousit či drážkovat. Při správné aplikaci je možné dosáhnout kvalitního povrchu odlitku který stačí mírně přebrousit. Využití vláknité izolace nalezneme především ve špatně přístupných místech, kde by se nám kapsa jen těžko odstraňovat, příklad na **obr. 15**.



Obr. 16 vláknité obklady [15]

V roce 1996 byly ve Španělsku poprvé předvedeny bezvláknité obklady. Tyto nové obklady jsou tvořeny mikrokuličkami z oxidu hlinitého o nízké hustotě (LDASC) (**Obr. 17**). Obklady mají stejné tepelné vlastnosti jako vláknité obklady. Avšak jejich pevnost a tuhost jsou značně vyšší. Mají též vyšší propustnost čímž, snižuje potíže s odvodem plynů. Je možné je vyrábět v nejrůznějších tvarech a rozměrech. [15], [16]



Obr. 17 LDASC obklady [15]

5 EXOTERMICKÉ OBKLADY

Dobu tuhnutí nálitku přirozených nám ovlivňuje rychlost a velikost tepla odvedené formou. Exotermické nálitky nám ovlivňují oba faktory. Při zaplnění nálitku taveninou dochází k zapálení exotermické směsi, čímž začne vyvíjet teplo. Tím se zpomaluje odvod tepla do formy a prodlužuje schopnost nálitku plnit svou funkci.

Celkové množství odvedeného tepla značeno jako Q je rovno součtu tepla vzniklého exotermickou reakcí Q_1 a tepla uvolněného z kovu v nálitku Q_2 .

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad [J] \quad (13)$$

Množství uvolněného tepla z exotermické reakce se stanoví podle složení nálitku. Zjednodušeně se dá vyvinuté teplo s exotermického nálitku vyjádřit pomocí množství hliníku ve směsi. [4]

$$Q_1 = \frac{m \cdot C_{Al}}{M_{Al}} \cdot q_r \quad [J] \quad (14)$$

Kde: Q_1 – množství tepla uvolněného exotermickou reakcí [J]
 m – hmotnost exotermické směsi v obkladu [g]
 C_{Al} – Koncentrace hliníku v exotermické směsi [%]
 M_{Al} – relativní atomová hmotnost hliníku [g.mol⁻¹]
 q_r – reakční teplo uvolněné reakcí 1 molu hliníku [J.mol⁻¹]

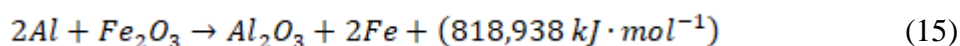
Časový průběh působení exotermických nálitků lze rozdělit do tří fází. První fáze je čas od odlití kovu až do zapálení exotermické směsi. V této fázi se exotermická směs chová jako běžná formovací směs a odebírá teplo z kovu. Intenzita ochlazování je vysoká. Po dosažení dostatečného tepla v nálitku dochází k zapálení exotermické směsi. Druhá fáze je průběh exotermické reakce až do vyhoření směsi. Náletek začne vyvíjet teplo. Intenzita reakce závisí na chemickém složení směsi. Třetí fáze začíná po dohoření exotermické směsi. Vyhořelá směs nyní slouží jako izolace a intenzita ochlazování závisí na vlastnostech vyhořelé směsi. U exotermických odlitků se může velikost reakce a jejich následná izolační schopnost značně lišit. Záleží na co výrobce klade důraz, zda dává přednost mohutné reakci nebo zda mu záleží na izolačních vlastnostech po zreagování. [4]

5.1 Typy exotermických směsí

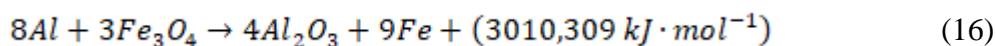
Směsi můžeme rozdělit do tří kategorií, a to podle chemického složení. Dělíme je na směsi termitové, křemíkové a uhlíkové.

5.1.1 Termitové směsi

Termitové směsi si nechal patentovat v roce 1902 pan Goldschmid. Směsi byly určeny pro svařování a ohřev nálitků. Vyvinutá termitová směs se skládala se směsi hliníkového prášku a oxidu železitého. Reakce probíhala podle následujících rovnic:



nebo



Následující reakce je velmi rychlá a po skončení mají výsledné produkty teploty cca 2000 °C. Pro zpomalení průběhu reakce se do směsi přidávají žáruvzdorné materiály, které způsobí nejen zpomalení reakce ale i sníží výslednou teplotu v produktu. Během hoření je spotřebováván kyslík obsažený v oxidu železa, a tak není nutný přístup kyslíku z atmosféry. [4]

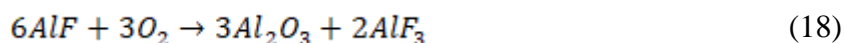
Tato směs má ale tři zásadní nevýhody a to, že při získání kyslíku z oxidu železa je třeba vysoké teploty. Během hoření vzniká železo, a to poté slouží jako vodič tepla mezi nálitkem a formovací směsí. A za třetí vzniká železo, které se promíchá s taveninou. [4]

Jako náhradní zdroj kyslíku se dají používat i jiné nosiče. Nejběžněji se používají dusičnany například NaNO_3 , KNO_3 nebo $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, u kterých se dá redukovat kyslík již při 300 °C. [4]

Směs se podařilo zlepšit v Anglii v roce 1949 firmou Foseco. Přišla na to, že prášek hliníku je schopný reagovat při nízkých teplotách kolem 350 °C po přidání malého množství fluoridu barnatého. U reakce bylo dosaženo i vyšších teplot, protože nebylo nutné provádět endotermickou reakci rozkladu oxidu železa. Tento důležitý objev dal vzniknout dnešním izotermickým materiálům. Pro získání oxidu v reakci je možné použít i jiné sloučeniny jako třeba fluoridy jako NaF , CaF_2 , kryolit Na_3AlF_6 , nebo chloridy NaCl . Následující reakce poté probíhá ve dvou fázích a to ve fázi při níž dochází k rozkladu fluoridů hliníkem, oxidaci příslušného kovu a hliníku za exotermické reakce. Podle rovnice:



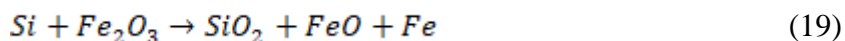
Po překročení teploty 800 °C dochází ke vzniku vysoce reaktivního plynu AlF , který z reaguje s kyslíkem v atmosféře podle rovnice:



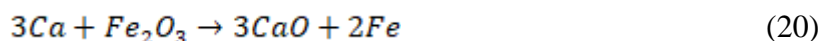
Tyto směsi mají lepší vlastnosti oproti staršímu typu termitové směsi. U nových směsí jsme schopni získat dvojnásobné množství tepla ze stejného množství hliníku. Zároveň během reakce nevzniká železo, a tak se vyhořeli obal stává i lepším izolantem. Podle zvoleného složení jsme schopni řídit teplotu reakce (od 300 °C do 1150 °C). [4]

5.1.2 Křemíkové směsi

Oxid železa se zde redukuje pomocí křemíku a chemická reakce probíhá podle rovnice:



Křemík je používán ve formě FeSi75 nebo FeSiCa . Pokud je při chemické redukci přítomen vápník reakce vypadá následovně:



Během procesu tuhnutí se do horních vrstev tekutého kovu může dostat křemík. Takto nalegovaná vrstva kovu má teplotu tuhnutí zhruba o 50 °C nižší tím pádem ztuhne nejpozději. [4]

5.1.3 Uhlíkové směsi

Redukce oxidu železa probíhá za pomoci uhlíku a vzniklá chemická reakce probíhá podle rovnice:



Uhlík se dodává jako prášek z dřevěného uhlí či rozdrceného koksu. Podobně jako křemík dochází k syčení povrchu tekutého kovu uhlíkem a tím i snížení teploty tuhnutí. [4]

5.2 Formovací směsi exotermických nálitků

U exotermických směsí není pouze jedna varianta složení. Ty se liší podle materiálu na, který se bude odlévat. Zároveň každá firma má svoje vlastní „know-how“, které j důsledně hlídáno. Obecně se však dá říci, že směs obsahuje okolo 10 až 15 položek, kde se liší použitá plniva pojiva, katalyzátory, okysličovadla a palivo. [4]

Plniva: Jsou to materiály, které ve směsi nereagují a slouží ke zpomalení reakce a také ke zlepšení izolačních schopností vyhořelé směsi. Používají se především křemičitý písek, šamot a pálené jíly. [4]

Pojiva: Pojiva se rozdělují do dvou kategorií, a to do pevných a tekutých. Pevné pojiva se přidávají do směsi s přítomností vody nejčastěji se užívá sulfidový louh nebo dextrin. Tekutým pojivem může být sodné vodní sklo či fenolformaldehydová pryskyřice. [4]

Katalizátory: Jsou látky, které podporují reakci jedná se převážně o fluoridové a chloridové soli (NaF , CaF_2 , Na_2SiF_6 , $NaCl$). [4]

Okysličovadla: Jedná se o chemické sloučeniny, které obsahují kyslík. Během reakce se rozkládají a kyslík nám slouží k hoření. Jedná o oxidy kovů (Fe_2O_3 , MnO_2), nebo dusičnany alkalických kovů (KNO_3 , $Ba(NO_3)_2$). Hlavním rozdílem je teplota, při které se sloučeniny rozkládají. U oxidů jsou teploty řádově vyšší než u alkalických kovů, u kterých rozklad začíná při 350 °C. [4]

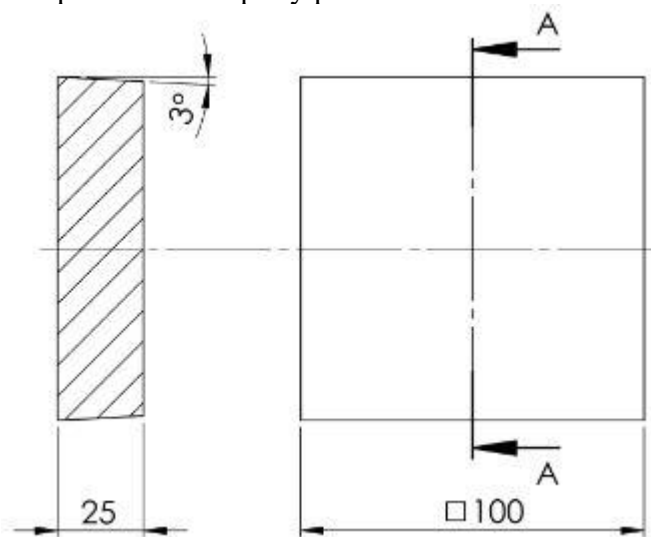
Paliva: U směsí na bázi křemíku se používá FeSi75. Uhlíkových směsí to je dřevěné uhlí nebo mletý koks. [4]

6 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem bakalářské práce bylo provést literární rozbor v oblasti nálitkování odlitků a problematiky exotermických nálitků. V rámci praktické části práce byl navržen experiment podle, kterého byl sledován vliv vlhkosti exotermického nálitku na tuhnutí taveniny. Pro porovnání účinnosti nálitků byl použit součinitel posunutí modelu nálitku, který byl vypočten dle **vzorce (2)**. Za účelem stanovení faktoru posunutí modelu f byly odlity též odlitky s exotermickým a přirozeným nálitkem.

6.1 Návrh experimentu

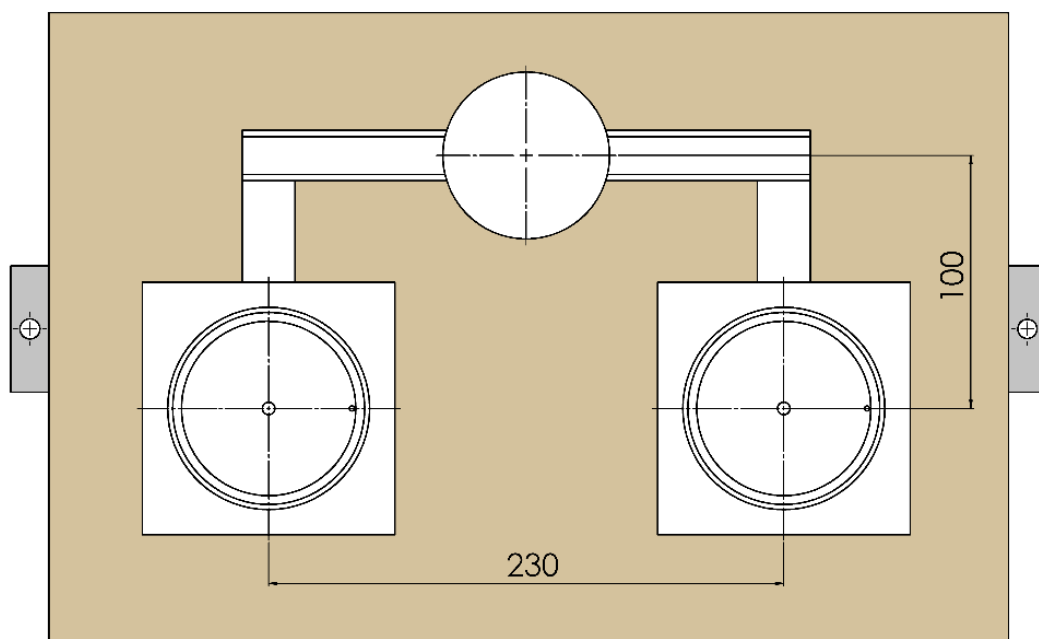
V rámci bakalářské práce byl navržen experiment s využitím modelu kvádrů, rozměry byly 100 x 100 x 25 mm s úkosem 3° (**Obr.18**). Do každé formy byly zaformovány dva odlitky spolu s nálitky a umístěny do geometrického středu odlitku (**Obr.19**). Nálitky byly předpřipraveny pro umístění termočlánků typu K (Cr-Al), které měřily teplotu taveniny v nálitku a ve stěně exotermického nálitku. Termočlánek pro snímání teploty v tavenině byl veden středem exotermického nálitku přibližně dvacet milimetrů od odlitku. Druhý termočlánek byl umístěn do stěny exotermického nálitku. V případě přirozeného nálitku byl použit jeden termočlánek pro snímání teploty při tuhnutí v tavenině.



Obr. 18 Odlitek

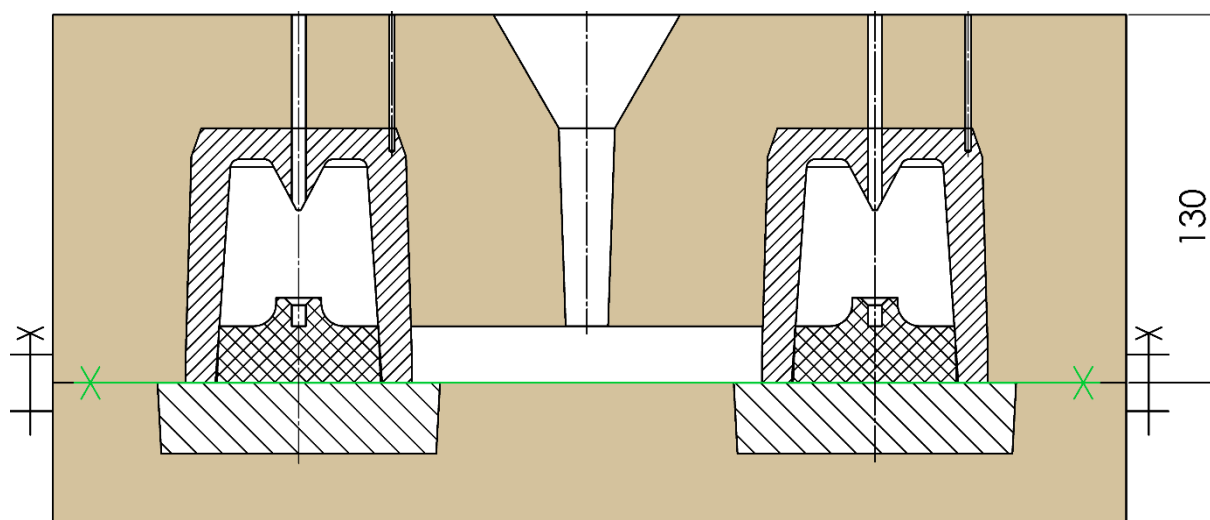
6.2 Realizace experimentu

Experiment byl proveden v univerzitní slévárně VUT v Brně. Formy byly vytvořeny pomocí samotvrdnoucí směsi, která se skládá z křemičitého písku Bk 27 ($d_{50} = 0,27$ mm), pojiva Geopol na bázi geopolymerů a tvrdidla. Směs byla připravována v průběžném lopatkovém míšiči. Pro zaformování byl použit nový křemičitý písek kolem modelu a na vyplnění formy byla použita regenerovaná směs. Doba zpracování směsi činila 20 až 30 min. Na **obr. 19** je zobrazeno uspořádání jednotlivých komponentů ve formě.



Obr. 19 Pohled rozložení ve formě

Ve spodní části formy byly zaformovány odlitky a vtokové kanály. Horní část formy obsahovala nálitky, rozváděcí kanál, vtokový kůl a termočlánky. Vkládané exotermické nálitky byly opatřeny dvěma předvrtanými otvory jeden ve středu nálitku pro měření teploty v kovu ($\varnothing 4$ mm) a druhý ve stěně pro měření teploty v exotermické směsi (**Obr. 20**). Do nich poté byly umístěny termočlánky typu K. Pro přesné umístění termočlánků v nálitcích byly v rámci bakalářské práce vytvořeny dva přípravky. První sloužil k přesnému umístění termočlánku v exotermických nálitcích a druhý pro umístění v přirozeném nálitku (**Obr. 21**). Forma byla poté ručně zaformována a po zatvrdnutí byly vyjmuty modely. Vtoková jamka byla vymodelována ručně.



Obr. 20 Řez formou



Obr. 21 pomocné přípravky zhotovené za pomoci 3D tisku

Celkem bylo vyrobeno a odlito šest forem. Z toho vyplývá, že bylo odlito dvanáct odlitků i s nálitky (3 přirozené a 9 exotermických nálitků). Celkem proběhly čtyři tavby, které byly provedeny za pomoci elektrické odporové pece LAC M 60/12. Teploty lití pro jednotlivé tavby jsou uvedeny v **Tab. 1**. Lící teploty byly u jednotlivých taveb téměř totožné. A tak můžeme říci, že lící podmínky byly u všech taveb stejné. Doba lití jedné formy byla přibližně 12 sekund. Stanovená surová hmotnost odlitku ve formě byla přibližně 2,8 kg.

Tab. 1 Lící teploty

	1. Tavba	2. Tavba	3. Tavba	4. Tavba
Teplota lití [°C]	727	730	727	727

Pro účely experimentu byly exotermické nálitky nejprve vysušeny po dobu dvou hodin v odporové peci při teplotě 200 °C. Nálitky byly z pece vytaženy zhruba za 4-5 hodin po vypnutí. Exotermické nálitky byly následně zváženy a očíslovány. Hmotnost byla zjištěna za pomoci digitální váhy s rozlišitelností na setiny gramu. Takto připravené nálitky byly umístěny do uzavřeného prostředí s různým obsahem vody. Exotermické nálitky byly ponechány minimálně 24 hodin v uzavřeném prostředí z důvodů homogenizace. Po vyjmutí nálitků z uzavřeného prostředí byly opět zváženy.

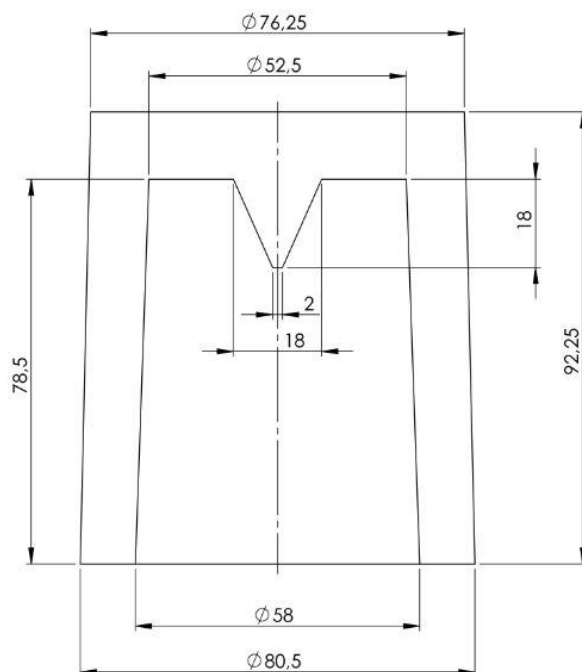
$$V_{exo.} = \frac{h_v - h_s}{h_s} \cdot 100 [\%] \quad (22)$$

Pomocí vzorce (14) byla vypočítána vlhkost exotermického nálitku vyjádřeného v procentech. Hmotnost vysušeného nálitku – h_s a hmotnost vlhčeného nálitku – h_v . Výsledky měření vlhkosti byly zaneseny do **tab. 2**.

Tab. 2 Přehled forem a nálitků

Forma	Tavba	Typ nálitku	Objem přidané vody [ml]	Vlhkost exo. nálitku [%]
F1	1.	Přirozený	0	0
		Exotermický	0	0
F2	2.	Přirozený	0	0
		Exotermický	0	0
F3	2.	Exotermický	1	0,6
		Exotermický	1	0,6
F4	3.	Přirozený	0	0
		Exotermický	10	5,5
F5	3.	Exotermický	5	3,5
		Exotermický	5	3,3
F6	4.	Exotermický	3	1,8
		Exotermický	3	1,5

Exotermické nálitky byly použity od italské společnosti Faprosid s.r.l.. Společnost byla založena v roce 1965. Jedná se o jednoho z největších evropských dodavatelů exotermických a izolačních materiálů pro slévárny a ocelárny. Na experiment byl použit exotermický náletek typu ISO-EXO 28 (**obr. 22**). Obklady jsou tvořeny bezvláknitou termitovou směsí s atmosférickým vrubem tzv. Williamsovo jádro. Výrobce uvádí dobrou izolační schopnost kombinovanou se silnou exotermickou reakcí. Je doporučován pro kovy s velkými intervaly tuhnutí (legované oceli a tvárnou litinu). Dle doporučení od výrobce lze použít i pro odlitky ze slitin hliníku. Technologické informace jsou uvedeny v **tab. 3**. [18]



Obr. 22 Rozměry exotermického obkladu ISO-EXO P691 [18]

Tab. 3 Charakteristika exotermického nálitku EXO P69I [18]

Typ	Objem [dm ³]	modul	
		tepelný	geometrický
P69I	0,18	1,73	1,05

Odlitky byly zhotoveny ze slitiny hliníku AlSi9Cu3(Fe) (DIN 226). Slitina má velký obsah mědi což zlepšuje obrobitelnost a mechanické vlastnosti. Nevýhodou vyššího obsahu mědi je zhoršení korozní odolnosti. Malé množství hořčíku vede ke tvorbě Mg₂Si, což vede k dalšímu zlepšení mechanických vlastností. Tato slitina má dobré slévárenské vlastnosti. A je zejména využívána pro odlévání složitých odlitků s tenkými stěnami, které jsou vystaveny dynamickému namáhání např.: části motoru, hlava válce, části elektromotorů....[17]

Tab. 4 Chemické složení slitiny AlSi9Cu3(Fe), hodnoty jsou uvedeny v % [17]

Fe	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Cu
max 1,3	8-11	max 0,55	max 0,55	max 0,15	max 0,25	2-4
Pb	Mg	Zn	Sn	Ostatní	Al	
max 0,35	0,05-0,55	max 1,2	max 0,55	Každý 0,05 ; Dohromady 0,25	zbytek	

Chemické složení slitiny AlSi9Cu3(Fe) je uvedeno v **Tab. 4**. Mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Cu3(Fe) jsou podle EN 1706:2010 uvedeny v **Tab. 5**. Mez pevnosti v tahu je u slitiny obvykle nad 240 MPa. Smluvní mez kluzu se pohybuje okolo 140 MPa. Tvrdost podle Brinella je okolo 80 HB. [17]

Tab. 5 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Cu3(Fe) [17]

Pevnost v tahu – R _m [MPa]	240
Smluvní mez kluzu – R _{p0,2} [MPa]	140
Tažnost A [%]	1
Tvrdost podle Brinella [HB]	80

Po odlití byla od odlitku oddělena vtoková soustava. Odlitky byly následně očištěny od zbytků formovací směsi. Od očištěných odlitků byly dále odděleny nálitky, které byly následně rozříznuty v geometrické ose nálitku na pásové pile Bomar Ergonomic 320.258 DG. Všechny nálitky i odlitky byly označeny pro identifikaci (**tab. 6**).

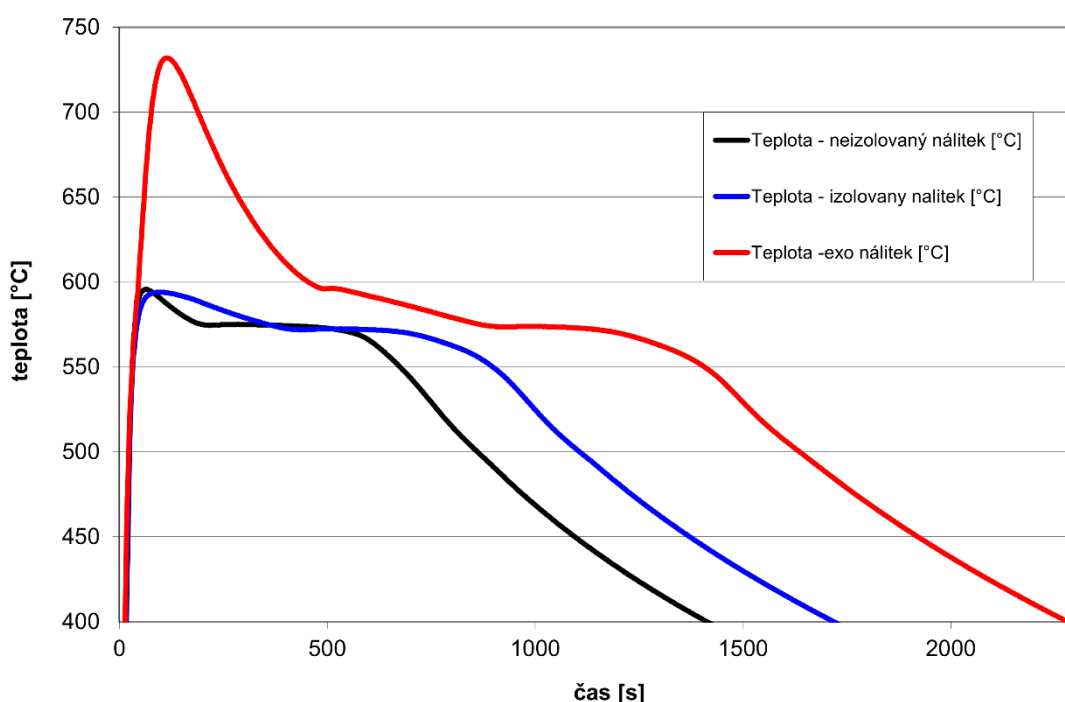
Tab. 6 Označení odlitků

Odlitek	1N	2E	3N	4E	5E	6E
Tavba	1	1	2	2	2	2
Vlhkost exo. nálitku [ml]	-	0	-	0	0,6	0,6
Odlitek	7N	8E	9E	10E	11E	12E
Tavba	3	3	3	3	4	4
Vlhkost exo. nálitku [ml]	-	10	5	5	3	3

7 VYHODNOCENÍ KŘIVEK CHLADNUTÍ

Hlavním výstupem experimentu byly teplotní křivky získané z kovu tuhnoucího v nálitcích. Porovnávány byly křivky chladnutí v přirozeném nálitku a v nálitku exotermickém. Cílem bylo stanovit vliv vlhkosti exotermické směsi na dobu tuhnutí kovu v nálitku.

Na **obr. 23** je vidět příklad křivek tuhnutí získaných při výuce slévárenské technologie předmětu POB. přirozeného, izolovaného a exotermického nálitku. **Obrázek 23** zde slouží jako názorná ukázka porovnání účinností přirozeného, izolovaného a exotermického nálitku stejného tvaru a objemu.



Obr. 23 Křivky chladnutí kovu v přirozeném, izolačním a exotermickém nálitku

Pro experiment na **obr. 23** byla využita slitiny hliníku. U přirozeného nálitku (černě) vidíme ihned po odlití, že teplota dosahuje 600 °C. Tato teplota odpovídá přibližně i teplotě likvidu. Během přibližně 100 sekund teplota klesá na 570 °C, což odpovídá eutektické teplotě. Doba tuhnutí činí cca 650 sekund.

U izolačního nálitku (modře) byla nižší rychlost ochlazování než u náletek přirozený. Doba tuhnutí činila 1000 sekund. Faktor posunutí modulu f izolačního nálitku byl vypočítán pomocí **vzorce 12** a byl roven 1,2. Izolační náletek má v tomto případě nižší hodnotu faktor posunutí modulu f , což je dáno pravděpodobně nízkou teplotou lití.

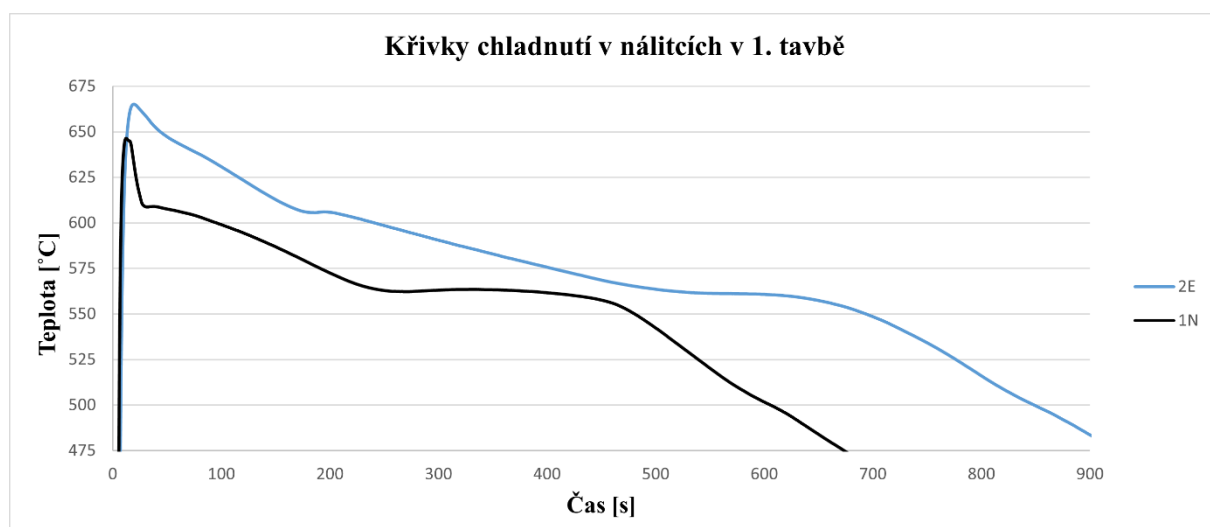
U exotermického nálitku (červeně) došlo po odlití k zapálení exotermické směsi a teplota taveniny v nálitku vzrostla na 730 °C. Poté teplota taveniny v nálitku klesala na teplotu 600 °C (teplota likvidu). Doba tuhnutí činila 1500 sekund. Faktor posunutí modulu f exotermického nálitku byl vypočítán pomocí **vzorce 12** a byl roven 1,5.

Podobný předpoklad o chování kovu v exotermickém nálitku byl i u vlastního experimentu. Očekávalo se, že po zapálení exotermické směsi vzroste teplota taveniny v nálitku a dojde tím

pádem i k prodloužení celkové doby tuhnutí taveniny v nálitku. Předpokládalo se, že s rostoucí vlhkostí směsi bude účinek exotermického nálitku nižší. To by znamenalo kratší časy tuhnutí a menší faktor posunutí modulu f .

Na **obr. 24** jsou uvedeny křivky tuhnutí kovu v nálitcích z první tavby. Teplota lití byla 727 °C. Křivka 1N (černě) byla křivkou tuhnutí kovu v přirozeného nálitku. Nejvyšší naměřená teplota byla 640 °C. Doba tuhnutí v přirozeném nálitku činila 500 sekund.

Křivka 2E (modrá) byla křivkou tuhnutí kovu ve vysušeném exotermickém nálitku. Po odlití byla naměřená teplota 660 °C. Navzdory očekávání nedošlo k naměření zvýšení teploty. Z toho lze usoudit, že nedošlo k zapálení exotermické směsi. Doba tuhnutí v přirozeném nálitku činila 700 sekund. Křivka chladnutí 2E byla výsledkem pouze izolačních schopností exotermického nálitku. Faktor f byl stanoven 1,24.

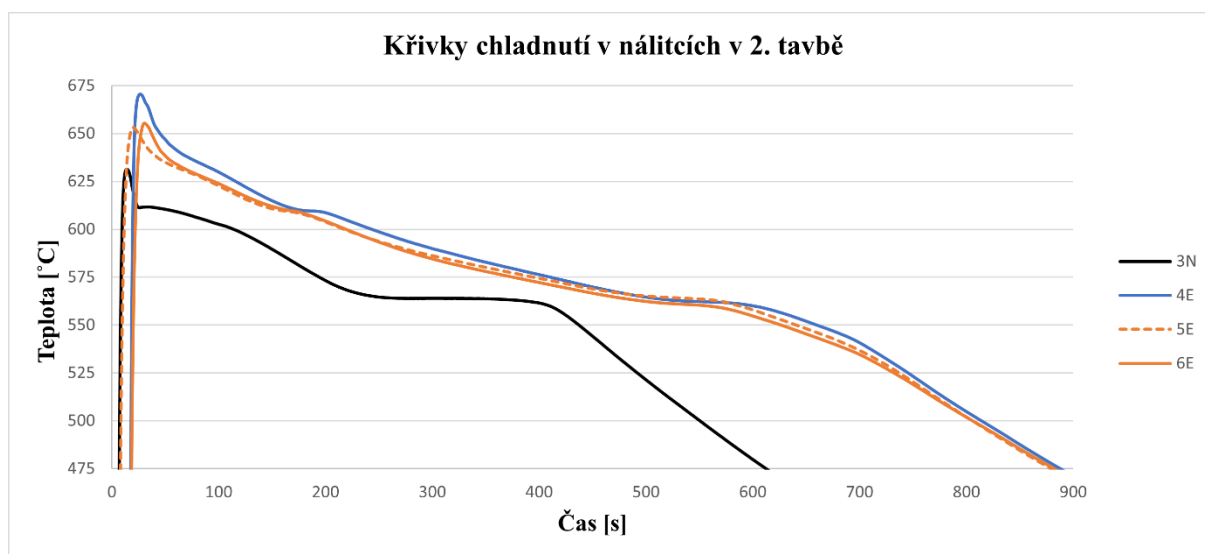


Obr. 24 Křivky chladnutí v nálitcích v 1. tavbě

Na **obr. 25** jsou uvedeny křivky tuhnutí kovu v nálitcích z druhé tavby. Teplota lití byla 730 °C. Křivka 3N (černě) byla křivkou tuhnutí kovu v přirozeného nálitku. Nejvyšší naměřená teplota byla 630 °C. Doba tuhnutí v přirozeném nálitku činila 450 sekund.

Křivka 4E (modrá) byla křivkou tuhnutí kovu ve vysušeném exotermickém nálitku. Po odlití bylo naměřená teplota 665 °C. Navzdory očekávání nedošlo k naměření zvýšení teploty z toho lze usoudit, že nedošlo k zapálení exotermické směsi. Doba tuhnutí v exotermickém nálitku činila 680 sekund. Křivka chladnutí 4E byla výsledkem pouze izolačních schopností exotermického nálitku. Faktor f byl stanoven 1,23.

Křivky 5E a 6E (oranžově) byla křivkou tuhnutí kovu ve vlhčeném exotermickém nálitku. Jednalo se o nálitky, které měly vlhkost 0,6 %. Tato vlhkost odpovídala vlhkosti nástavců skladovaných ve školní slévárně. Po odlití bylo naměřená teplota 655 °C. Navzdory očekávání nedošlo k naměření zvýšení teploty z toho lze usoudit, že nedošlo k zapálení exotermické směsi. Doba tuhnutí v exotermickém nálitku činila 650 sekund. Křivky chladnutí 5E a 6E byly výsledkem pouze izolačních schopností exotermického nálitku. Faktor f byl stanoven u nálitku 5E 1,18 a u nálitku 6E 1,17.

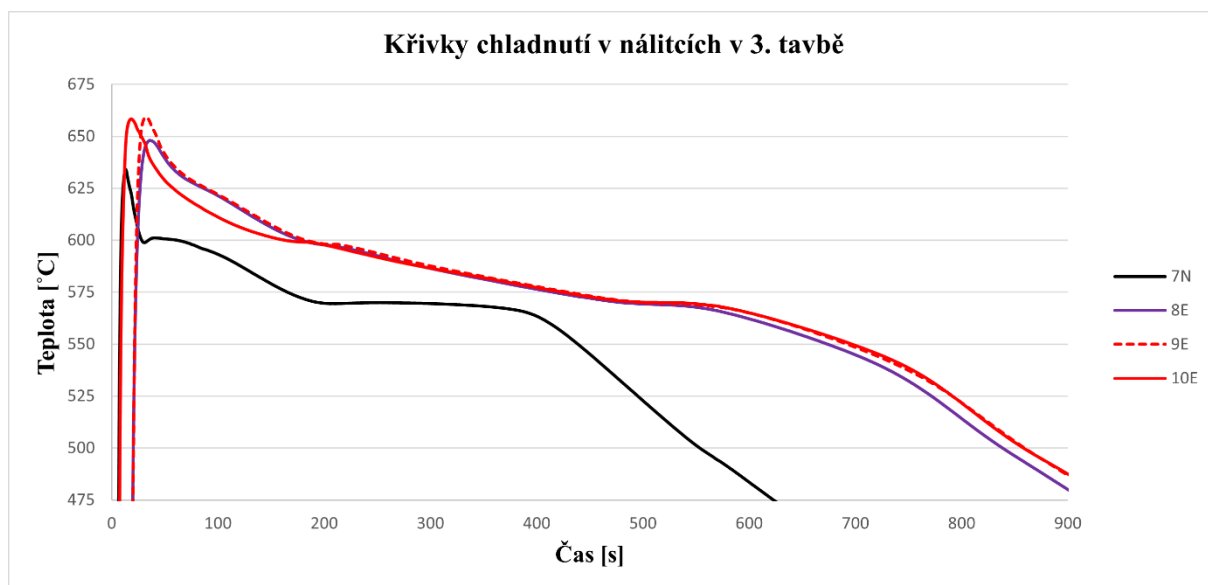


Obr. 25 Křivky chladnutí v nálitcích v 2. tavbě

Na **obr. 26** jsou uvedeny křivky tuhnutí kovu v nálitcích z třetí tavby. Teplota lití byla 727 °C. Křivka 7N (černě) byla křivkou tuhnutí kovu v přirozeného nálitku. Nejvyšší naměřená teplota byla 630 °C. Doba tuhnutí v přirozeném nálitku činila 440 sekund.

Křivka 8E (fialová) byla křivkou tuhnutí kovu ve vlhčeném exotermickém nálitku. Jednalo se o nálitky, které měly vlhkost 5,5 %. Po odlití byla naměřená teplota 650 °C. Navzdory očekávání nedošlo k naměření zvýšení teploty z toho lze usoudit, že nedošlo k zapálení exotermické směsi. Doba tuhnutí v exotermickém nálitku činila 680 sekund. Křivka chladnutí 8E byla výsledkem pouze izolačních schopností exotermického nálitku. Faktor f byl stanoven 1,22.

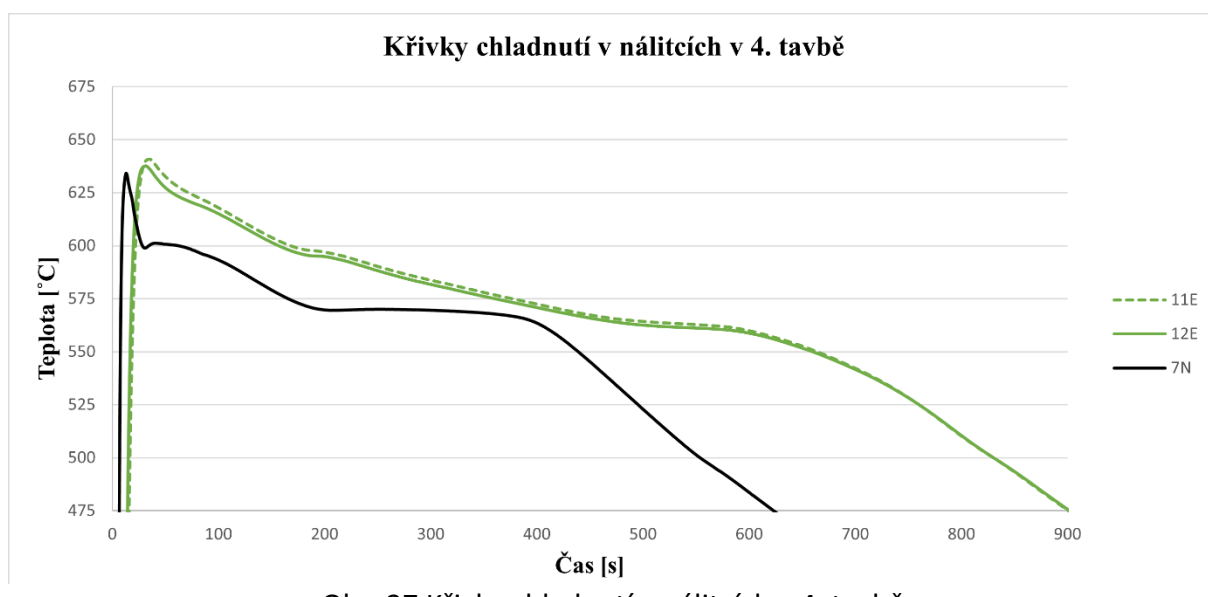
Křivky 9E a 10E (oranžově) byly křivkami tuhnutí kovu ve vlhčených exotermických nálitcích. Jednalo se o nálitky, které měly vlhkost 3,5 % (9E) a 3,3 % (10E). Po odlití byla naměřená teplota 655 °C. Navzdory očekávání nedošlo k naměření zvýšení teploty z toho lze usoudit, že nedošlo k zapálení exotermické směsi. Doba tuhnutí v exotermickém nálitku činila 700 sekund. Křivky chladnutí 9E a 10E byly výsledkem pouze izolačních schopností exotermických nálitků. Faktor f byl stanoven u nálitků 9E a 10E 1,24.



Obr. 26 Křivky chladnutí v nálitcích v 3. tavbě

Na **obr. 27** jsou uvedeny křivky tuhnutí kovu v nálitcích z čtvrté tavby. Teplota lití byla 727 °C. Křivka 7N (černě) byla použita z třetí tavby pro porovnání s křivkami tuhnutí exotermických nálitků.

Křivky 11E a 12E (zeleně) byly křivkami tuhnutí kovu ve vlhčených exotermických nálitcích. Jednalo se o nálitky, které měly vlhkost 1,8 % (11E) a 1,5 % (12E). Po odlití bylo naměřena teplota 640 °C. Navzdory očekávání nedošlo k naměření zvýšení teploty z toho lze usoudit, že nedošlo k zapálení exotermické směsi. Doba tuhnutí v exotermickém nálitku činila 670 sekund. Křivky chladnutí 11E a 12E byly výsledkem pouze izolačních schopností exotermických nálitků. Faktor f byl stanoven u nálitku 5E 1,21 a u nálitku 6E 1,20.



Obr. 27 Křivky chladnutí v nálitcích v 4. tavbě

Z vypočítaného faktoru posunutí modelu f (**tab. 7**) nebyl prokázán žádný prokazatelný vliv vlhkosti exotermické směsi na její dosazovací vlastnosti. Je nutné však přihlídnout k tomu, že rozdíly ve faktoru f se pohybují v rozmezí cca 1,18 – 1,24. Během experimentu nedošlo k úspěšnému zapálení exotermický nálitků. Uvedené výsledky se tedy vztahují pouze k izolačním schopnostem daných exotermických nálitků. Pro úspěšné provedení experimentu by bylo vhodné zvolit slitinu s vyšší teplotou lití, nebo změnit typ exotermického nálitku.

U termočlánků snímajících teplotu exotermické směsi nebyla zaznamenána žádná hodnota přesahující teplotu taveniny v nálitku. Tím bylo potvrzeno, že nedošlo k zapálení exotermických nálitků.

Tab. 7 Faktor posunutí modulu f v nálitcích

Náitek	2E	4E	5E	6E	8E	9E	10E	11E	12E	Průměrná hodnota	Odchylka
Faktor posunutí modulu f	1,24	1,23	1,18	1,17	1,22	1,24	1,24	1,21	1,20	1,21	0,03

8 OBJEM STAŽENINY V NÁLITKU

Objem staženiny byl změřen po rozřezání nálitku. Objem staženiny byl vyplněn jemným pískem, jehož objem byl stanoven pomocí odměrného válce s přesností 1 ml. K objemu staženiny byl následně připočten objem odstraněný řezáním. Ten byl stanoven vypočítáním plochy staženiny v místě řezu a následně vynásoben tloušťkou pilového pásu. Do **tabulky 8** byly zaneseny výsledné hodnoty objemu staženiny.

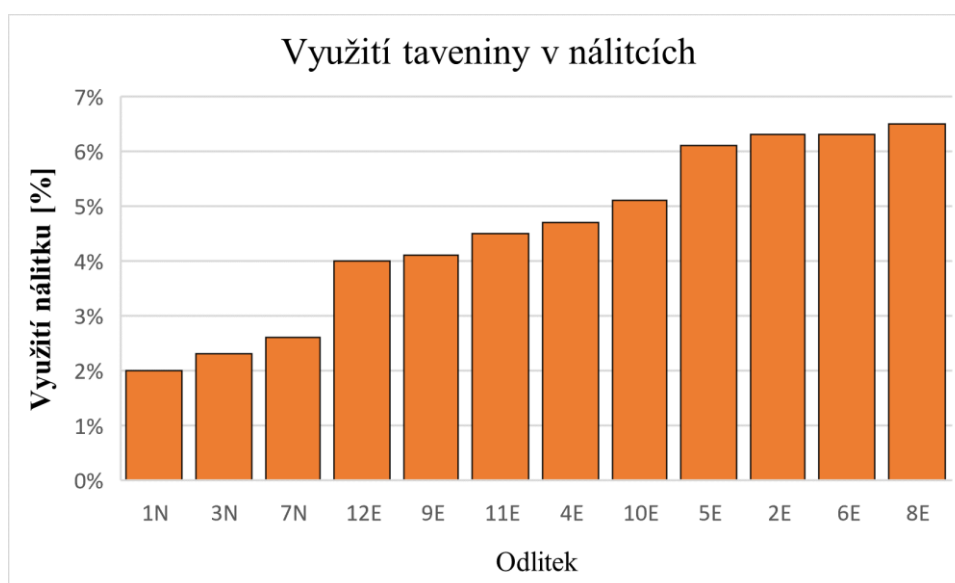
Tab. 8 Naměřený objem staženin

Náletek	1N	2E	3N	4E	5E	6E
Objem staženiny [ml]	5,2	16,2	5,8	12,2	15,6	16,1
Využití nálitku [%]	2	6,3	2,3	4,7	6,1	6,3
Náletek	7N	8E	9E	10E	11E	12E
Objem staženiny [ml]	6,6	16,8	10,6	13	11,7	10,2
Využití nálitku [%]	2,6	6,5	4,1	5,1	4,5	4

Za použití **vzorce 23** byl u nálitku vypočítáno její využití. V_n – odpovídá objemu nálitku a V_s – odpovídá objemu staženiny.

$$V_t = \frac{V_s}{V_n} \cdot 100 [\%] \quad (23)$$

Výsledky byly zapsány do **tab. 8** a následně vyneseny i do grafu (**obr. 28**).



Obr. 21 Grafu Využití nálitků

Na **obr. 29** je vidět staženina exotermického nálitku 11E (vlevo) v porovnání se staženinou v přirozeném nálitku 7N (vpravo). Nejmenší staženina byla vytvořena u přirozeného nálitku a vznikala pod atmosférickým vrubem (Williamsovo jádro).

U exotermických nálitků byla staženina vždy vytvořena vedle atmosférického vrubu. U nálitku 11E je vidět na **obr. 29**, že staženina zasahuje do více než poloviny nálitku. Na tvaru staženiny se projevuje vliv izolačních schopností nálitku. Navzdory očekávání nebyla zapálena exotermická směs tím pádem se nám na nálitku neprojevily jej účinky. Obrázky všech nálitků jsou dostupné v příloze.



Obr. 29 Ukázka staženiny v exotermickém nálitku (vlevo) a přirozeného (vpravo)

ZÁVĚRY

Bakalářská práce měla za cíl provést literární rešerši v oblasti nálitků. V rámci experimentální práce byl navržen pokus, který měl ověřit vliv vlhkosti exotermické směsi na dosazovací schopnost exotermického nálitku.

V bakalářské práci byl proveden literární rozbor, v němž byla rozebrána podstata a princip exotermických nálitků. Byly rozebrány jednotlivé dominantní faktory, které mají vliv na využití nálitků. Následně byl proveden experiment, kde byla navržena vtoková soustava spolu s modelovým zařízením. Experiment byl proveden na nálitcích s odstupňovanou úrovní vlhkosti. Na nálitcích byla vybrána místa pro měření teplotních křivek chladnutí kovu v exotermickém nálitku. V průběhu experimentu byly měřeny teplotní křivky a hodnoceny objemy staženin.

Z výsledků vyplynulo několik zásadních skutečností. Faktor posunutí modulu nálitku f se pohyboval v rozmezí 1,18 až 1,24. Hodnoty vyšly relativně nízké. U žádného exotermického nálitku nebylo naměřeno zvýšení teploty kovu. Z toho vyplývá, že nedošlo k zapálení exotermické směsi nálitků. Exotermické směsi nebyly zapáleny navzdory relativně dobré lici teplotě 730 a 727 °C. Doporučuji provést další měření s vlivem vlhkosti na exotermické nálitky s použitím vhodnějších exotermických nálitků.

Dále byly hodnoceny objemy staženin a z nich vyplynulo, že u všech exotermických nálitků došlo k podobnému využití taveniny. Tvar staženin u exotermických nálitků byl ovlivněn nezapálením exotermické směsi. Staženina u exotermických nálitků zasahuje hlouběji do nálitku než staženina u neizolovaného nálitku. Z toho vyplývá, že daný exotermický náletek nebyl pro daný experiment a dané podmínky vhodnější než použití přirozeného nálitku.

V případě pokračování s výzkumem vlivu vlhkosti na exotermické nálitky by bylo vhodné použít exotermické nálitky s nižšími zápalnými teplotami pod stejnou metodikou. Doporučuji provést měření u litin, kde má tavenina podstatně vyšší teplotu, pravděpodobně již dojde k zapálení exotermické směsi a výsledky budou více prokazatelné.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [1]

1. CITACE PRO.: Generátor citací [online]. 2021 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
2. ELBEL, T. *Vady odlitků ze slitin železa: klasifikace, příčiny a prevence*. Brno: Matecs, 1992. ISBN (Váz.).
3. LUKEŠ, R., P. MACHOVČÁK, P. KLEPEK, et al. *Sborník přednášek z 53. slévárenských dnů: Blok A – Sekce technologická*. Brno: Česká slévárenská společnost, 2016. ISBN 978-80-02-02687-7.
4. KRUTIŠ, V. Vliv tepelného ošetření nálitků na tuhnutí kovu. Brno, 2003. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
5. CAMPBELL, J. *Castings*. 2. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1993. ISBN 0-7506-4790-6.
6. PÍŠEK, František, Zdeněk HOSTINSKÝ a Adolf Martin PLEŠINGER. *Slévárenství II: Určeno [také] studentům stř. a vys. škol techn. směru/Speciální část*. Praha: SNTL, 1975, 403 s.
7. SIGWORTH, G. K. *Shrinkage, Feeding and Riser Design*. American Foundry Society, 2014
8. *Návrh odlitků a vtokové soustavy – Nálitky* [online]. [vid. 2021-04-01] Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/105/cvic-odlitek.pdf>
9. FISCHER, S. A. *Moderní způsoby nálitkování - historie a současnost*. Slévárenství, 2014
10. BERNÁŠEK, Vladimír a Jan HOREJŠ. *Technologie slévání*. 3., upr. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006, 175 s. : il. ISBN 80-7043-491-0.
11. ČADA, R. *Technologie I., část tváření a slévání (návod do cvičení)*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2008, 188 s. ISBN 80-7078-540-3.
12. NOVOTNÝ, Jiljí, Jan ŠANOVEC, Bohumír BEDNÁŘ a Viktor KREIBICH. *Technologie I (Slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*, Praha: ČVUT, 1999, ISBN 80-01-01420-7.
13. GRÍGEROVÁ, Tatiana, Ivan LUKÁČ a Rudolf KOŘENÝ. *Zlievarenstvo neželezných kovov*. Bratislava, 1988. Edícia hutníckej literatúry (Alfa)
14. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
15. FISCHER, S. A. *Moderní způsoby nálitkování - historie a současnost*. Slévárenství, 2014, č. 9-10, s 364 – 368.

16. AUFDERHEIDE, R.C., R.E. SHOWMAN, H. TWARDOWSKA. *New developments in riser sleeve technology*, AFS Transactions, 1998. roč. 106, 395 s. ISSN: 0065-8375
17. VONČINA, Maja, Nataša MOČNIK, Aleš NAGODE, Antun STOIĆ a Milan BIZJAK. DEPENDENCE OF MECHANICAL PROPERTIES ON Cu CONTENT IN AlSi9Cu3(Fe) ALLOY [online]. 2017, Tehnički vjesnik(24), 229-231 [cit. 2021-5-1]. ISSN 1848-6339. Dostupné z: <https://hrcak.srce.hr>
18. Firemní materiál. FAPROSID [online]. [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.faprosid.com/it/c/manicotti-esotermici/tipo-p-manicotti-precise-6899.html>
19. Numerická simulace významný pomocník slévárenské technologie. Technickytydenik [online]. 2006 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/numericka-simulace-vyznamny-pomocnik-slevarenske-technologie_17516.html
20. SLOVÁK, Stanislav a Karel RUSÍN. *Teorie slévání*. Praha: SNTL, 1990, 231 s. ISBN 80-03-00400-4.
21. PLACHÝ, Jan, Jiří PROCHÁZKA a Jan PRUDKÝ. *Technologie slévání, tváření a svařování*. Praha: ČVUT Praha, 1970, 158 s.
22. HORÁČEK, Milan. *Teorie slévání*, 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1991, ISBN 80-214-0293-8.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady odlitků ze slitin hliníku (lité kolo, píst, blok spalovacího motoru).....	9
Obr. 2 Schéma odlitku vytvořeného pomocí usměrněného tuhnutí a) a pomocí neusměrněného tuhnutí b) [6].....	10
Obr. 3 Dvoufázové pásmo [13].....	11
Obr. 4 Místa vzniku tepelného uzlu [22].....	11
Obr. 5 Otevřená staženina (vlevo) a uzavřená staženina (vpravo) [2].....	12
Obr. 6 Využití kovu u nálitkování stejného modelu. Zleva přirozený nálitek, nálitek s exotermickým obkladem a ECO-nálitek [9].....	13
Obr. 7 Schematické znázornění typů odlitků [8].....	14
Obr. 8 Umístění otevřeného a uzavřeného nálitku [10].....	14
Obr. 9 Umístění přilehlého a odlehlého nálitku [10].....	14
Obr. 10 a) podtlak, b) atmosférický, c) přetlak [10].....	15
Obr. 11 Tvary nálitků [13].....	15
Obr. 12 Metoda vepsaných koulí [8].....	16
Obr. 13 Dosazovací schopnost nálitku [8].....	17
Obr. 14 Nevhodné a doporučené tvary nálitků [21].....	18
Obr. 15 Použití izolace KAPLAD na místo kapsy [3].....	20
Obr. 16 vláknité obklady [15].....	21
Obr. 17 LDASC obklady [15].....	21
Obr. 18 Odlitek.....	25
Obr. 19 Pohled rozložení ve formě	26
Obr. 20 Řez formou.....	26
Obr. 21 pomocné přípravky zhotovené za pomoci 3D tisku.....	27
Obr. 22 Rozměry exotermického obkladu ISO-EXO P69I [18]	28
Obr. 23 Křivky chladnutí kovu v přirozeném, izolačním a exotermickém nálitku.....	30
Obr. 24 Křivky chladnutí v nálitcích v 1. tavbě.....	31
Obr. 25 Křivky chladnutí v nálitcích v 2. tavbě.....	32
Obr. 26 Křivky chladnutí v nálitcích v 3. tavbě.....	33
Obr. 27 Křivky chladnutí v nálitcích v 4. tavbě.....	33
Obr. 22 Grafu Využití nálitků.....	35
Obr. 29 Ukázka staženiny v exotermickém nálitku (vlevo) a přirozeného (vpravo).....	36

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Lící teploty	27
Tab. 2 Přehled forem a nálitků	28
Tab. 3 Charakteristika exotermického nálitku EXO P691 [18]	29
Tab. 4 Chemické složení slitiny AlSi9Cu3(Fe), hodnoty jsou uvedeny v % [17]	29
Tab. 5 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Cu3(Fe) [17]	29
Tab. 6 Označení odlitků	29
Tab. 7 Faktor posunutí modulu f v nálitcích	34
Tab. 8 Naměřený objem staženin	35

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Fotky nálitků

Příloha 1



Obr. 1 náletek 1N



Obr. 2 náletek 2E



Obr. 3 nálitek 3N



Obr. 4 nálitek 4E (chybně označen)



Obr. 5 nálitek 5E



MI NOTE 9

Obr. 6 nálitek 6E



Obr. 7 nálitek 7N



Obr. 8 nálitek 8E



Obr. 9 náletek 9E



Obr. 11 náletek 10E



Obr. 11 náitek 11E



Obr. 12 náitek 12E